干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

doi:10.12118/j.issn.1000－6060.2019.04.15

扎龙盐沼湿地对乌裕尔流域径流变化的水文响应①

罗金明， 王永洁， 刘复刚， 柏 林， 王治良

（齐齐哈尔大学理学院，黑龙江 齐齐哈尔 161006）

摘 要：乌裕尔河流域水环境的变化导致下游湿地迅速退化。探讨了近65 a(1951—2015)扎龙湿地系统对乌裕尔河流域径流量变化的响应。结果表明：乌裕尔河中下游的径流量急剧减少给下游湿地的演替带来明显的影响，上游来水供给不足导致湿地长期处于干旱缺水的状态，湿地水面面积与蓄水量显著减少，并导致扎龙湿地地下水位显著降低($P<0.05$)。湿地持续干旱缺水引发此区域大面积的沼泽退化并发生次生盐渍化。近年来，扎龙湿地发育的盐渍土面积达到250 km^2以上，并且向核心区蔓延。湿地持续退化对在湿地栖息和繁殖的珍稀水禽带来巨大的冲击。

关 键 词： 内陆盐沼；湿地退化；盐渍化；干旱胁迫

文章编号： 1000－6060(2019)04－0838－07(0838～0844)

湿地健康的演替对于地表系统的稳定十分重要[1]。近年来全球的湿地迅速消失引起人们格外的关注。半湿润—半干旱区的盐沼湿地系统的结构和功能往往更加脆弱[2]，这些流域水量的平衡改变是本地区盐沼湿地退化的重要原因[3]。例如，大坝建设以及森林砍伐等人类活动都可能改变流域的水文特征，进而带来盐沼区的土壤系统迅速改变[4－6]。

松嫩平原西部具有气候干旱、地势低平以及地下水位浅等地理环境特征，这些因素综合作用发育了广袤的碱性沼泽[7]。然而，近年来本地区大面积沼泽不断的转变成盐渍化土壤；尽管已经采取大量的保护措施，本地区退化土壤的面积仍然处于不断扩大的变化趋势。研究表明，人为不合理开发利用水资源引发的水环境变化是本地区土壤退化的重要原因[8]。例如，位于松嫩平原西北的乌裕尔河流域上游因为修建大量的水库截水灌溉，导致进入下游湿地的水流量减少了70%以上[9－10]。虽然人们已经通过一定措施努力缓解湿地的干旱化步伐，但是湿地干旱缺水引发的退化并没有得到根本性的改观[11]。持续干旱的大趋势下外加人类强烈干扰共同改变了湿地原来的自然属性，进而可能对湿地生态健康带来威胁，局地尺度土壤系统的演替往往受更大尺度环境变化的影响。已有研究从土壤学的角度探讨了本地区湿地退化和盐渍化迅速发展原因[7－12]，尚缺少从整个区域水环境的改变对于局地尺度土壤演变的影响的相关研究。

基于研究区近60 a来(1951—2015)的降雨量、径流数据以及土壤数据，探讨了该流域径流量的变化以及扎龙湿地的响应特征。研究结果有助于了解本地区湿地的退化机理，可为湿地的保护提供参考。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

扎龙湿地位于松嫩平原西部地区，行政区跨越黑龙江省齐齐哈尔和大庆两地。气候特征来看，扎龙湿地位于东亚季风带北端，年蒸发潜力为降雨量的四倍，这种气候条件导致本地区春季和秋季相对干旱缺水，也导致浅层地下水和地表水矿化度较高[13]。扎龙湿地包括大面积原生芦苇沼泽和丰富的生物种类，这为多种水鸟(也包括丹顶鹤)提供充足的食物和良好的栖息环境。近年来，环境的变化以及人为强烈扰动造成扎龙湿地迅速退化，也影响了鸟类种群的稳定[13]。

本研究收集整个流域上游下游近65 a(1951—2015)的径流量数据，分析乌裕尔河流域不同河段水流量的变化特征以及影响因素。同时，在扎龙保

① 收稿日期：2018－11－01； 修订日期：2019－03－29
基金项目：国家自然基金项目(41771250)，国家重点研发计划项目(2016YFC0501201)；黑龙江省省属高等学校基本科研业务费科研项目(135209248)；齐齐哈尔市哲学社会科学规划项目(QSX2018－01LP)
作者简介：罗金明(1977－)，男，四川成都人，教授，博士，从事盐沼湿地演替与水盐运移研究. E-mail:luojm1000@163.com

护区管理局设置地下水位监测井记录地下水位的变化情况。

1.2 旱涝程度界定

扎龙湿地的水分收益来自于大气降水、上游来水以及区间来水(例如嫩江来水和人工生态补水)。研究本湿地旱涝情况应该既考虑降雨盈缺状况,也应该考虑进入湿地的实际水量。本研究参照文献[14]的研究结论,把每年5月湿地的平均蓄水量与湿地理想蓄水量,具体旱涝等级划分见文献[14]。

1.3 M-K突变检测与滑动 t 检验

Mann-Kendall(M-K)方法在确定一定时间序列的气象、水文数据的变化趋势以及突变性具有独到的优势[15]。本文使用M-K方法检验研究区近65 a来降雨量和径流量是否发生显著变化。M-K模型检验突变的原理:

在时间序列随机独立的假定下,定义统计量 UF_k:

$$UD_k = \frac{[s_k - E(s_k)]}{\sqrt{Var(s_k)}} \quad (k = 1, 2, \cdots, n) \qquad (1)$$

式中:$E(s_k)$ 和 $Var(s_k)$ 是累计数 s_k 的均值和方差。

本研究同时结合滑动 t 检验进行验证。通过把时间序列中两段子序列均值的显著差异性来反映总体的差异的问题特征。若子序列的均值差异达到显著性差异水平,则认为总体样本有突变发生。统计环境变量如果 <0.05 则认为发生显著性变化。

2 结果与分析

2.1 径流量变化特征

图1a显示,20世纪50~60年代中期乌裕尔河上游径流量为整个研究期的高峰时段,之后开始逐渐减少,到1976年径流量已经减少到不足 1×10^8 m³。M-K检验表明(图1b),在1966年前后存在突变点,滑动 t 检验检测到1967年显著突变的特征(图1c)。20世纪80年代到2015年北安地区的径流量稳定在 10×10^8 m³ 左右变化,这期间上游的径流量没有发生明显的变化。

乌裕尔河中下游在近65 a的径流量的变化却呈现出截然不同的特征。从图2a可见,农安桥的径流量整体上表现为震荡式衰减的特征。研究时段初的径流量可以达到 8×10^8 m³ 以上,到20世纪60年代则减少20%,21世纪以来则径流量进一步减少

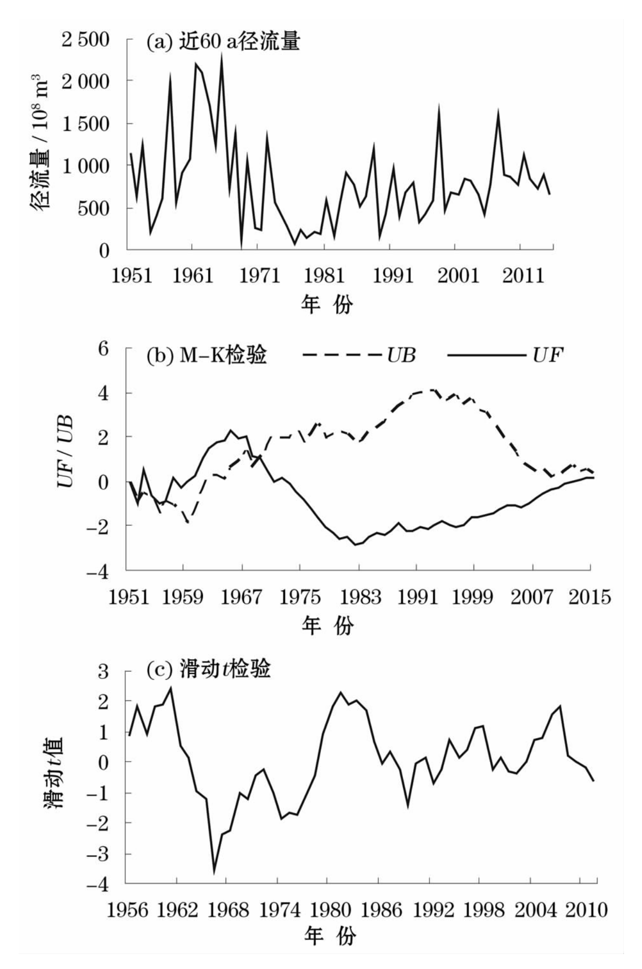


图1 乌裕尔河上游(北安站)近65 a径流量及显著性检验结果

Fig. 1 Fluctuations of runoff contents in the upper reaches of Wuyur River (the Bei'an hydrological station) and the results of the significant test

40%以上,最低年份不足 1×10^8 m³。M-K检验和滑动 t 检验结果也表明了流域中下游径流量呈现整体减少的特征,并且在1982年和2000年存在突变点(图2b、2c),该时段进入湿地的径流量显著减少。

综上可知,在20世纪80年代以前后整个流域的径流特征发生了显著的变化。研究表明,20世纪70年代以后,乌裕尔河上中游修建了大大小小几十座水库,上游的水分绝大部分直接被上游水库截留用于农业灌溉[9]。这就解释了农安桥径流量在20世纪80年代初发生显著性减少的现象。

表1可见,扎龙湿地来水不同时段存在明显差异,1980s以前降雨所占湿地水分收益的57%,上游来水可以满足湿地整个入水的38%;80年代至2000年上游来水所占比例下降为19%,近年来进一步下降为14%。虽然每年人工生态补水使扎龙湿地的区间来水的增加到 1×10^8 m³,但是整个扎龙湿

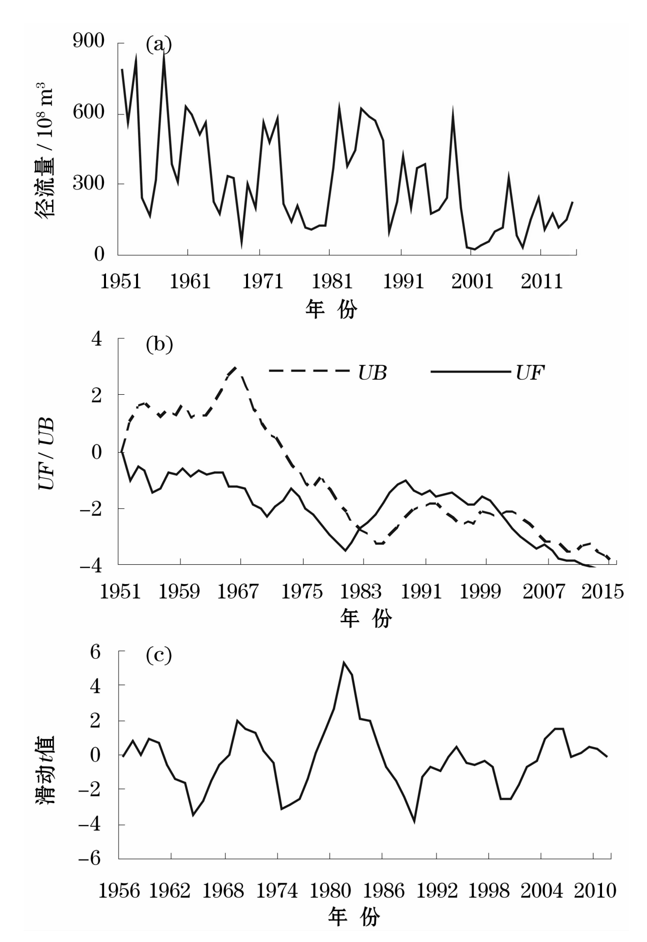


图 2　农安桥站近 65 a 径流量(a)以及 M-K 检验以及 5 a 滑动 t 检验结果变化(b 和 c)

Fig. 2　Fluctuations of runoff contents at the Nong'anqiao hydrological station (a) and the significant change by the M-K test and 5-year step moving t-test (b and c) in recent 65 years

表 1　扎龙湿地近 65 a(1951—2015)不同时段来水组成

Tab. 1　Components of water income in different periods in Zhalong wetland

	1951—1980 年		1981—2000 年		2001—2015 年	
	10^8 m³	所占比例 / %	10^8 m³	所占比例 / %	10^8 m³	所占比例 / %
降雨量	7.27	57	7.12	66	7.23	84
上游来水	4.98	38	2.09	19	1.25	14
区间来水	0.66	5	1.65	15	1.12	13
总量	13.11	100	10.86	100	9.60	100

地入水总量也从 20 世纪 50 年代的 13×10^8 m³ 下降为近年的 9.6×10^8 m³。研究表明,维持扎龙湿地正常的生态功能需要水量为 10×10^8 m³ 以上,这其中 40% 以上水分主要靠上游径流补充[14]。当大部分上游径流难以顺畅的进入下游,必然带来下游长期缺水干旱状态,最终导致湿地功能迅速退化。

2.2　流域水环境变化对湿地的影响

图 3a 可见,流域上游的径流量在 1980 年以前与扎龙湿地蓄水量的关系达到显著水平;但是,这一关系从 1980 年以后发生显著变化(图 3b)。比较而言,湿地入水口的径流量则与其蓄水量保持显著正相关(图 3c)。由此可知,研究区中游地区人为活动的加强彻底改变了流域上游径流与下游关联性。

从图 4 可见,80 年代以前,扎龙湿地蓄水量程度几乎都属于偏湿涝状态,在 80 年代中后期于干旱缺水状态。通过对研究区旱涝情况进行统计发现(图 4),70 年代以前干旱年份和湿涝年份占比例相当(大约 35%),正常年份占 30%。

从图 5 可见,湿地水面面积与自然蓄水量相关性达到显著水平,即蓄水量直接影响着湿地沼泽面积。由于湿地蓄水量持续减少且处于干旱缺水状态,必然导致湿地发育的沼泽面积迅速减少同时导

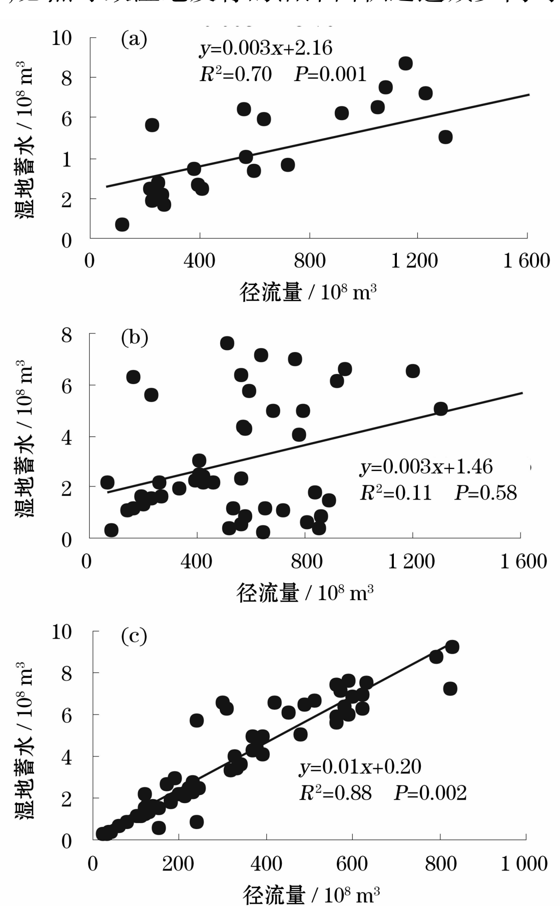


图 3　北安站(a: 1951—1980 年; b: 1981—2015 年)和农安桥站(c)的径流量与湿地蓄水量的关系

Fig. 3　Correlation of water storage in the wetland and runoff in the Bei'an station (a: 1951—1980; b: 1981—2015) and Nong'anqiao station (c) of Wuyur catchments

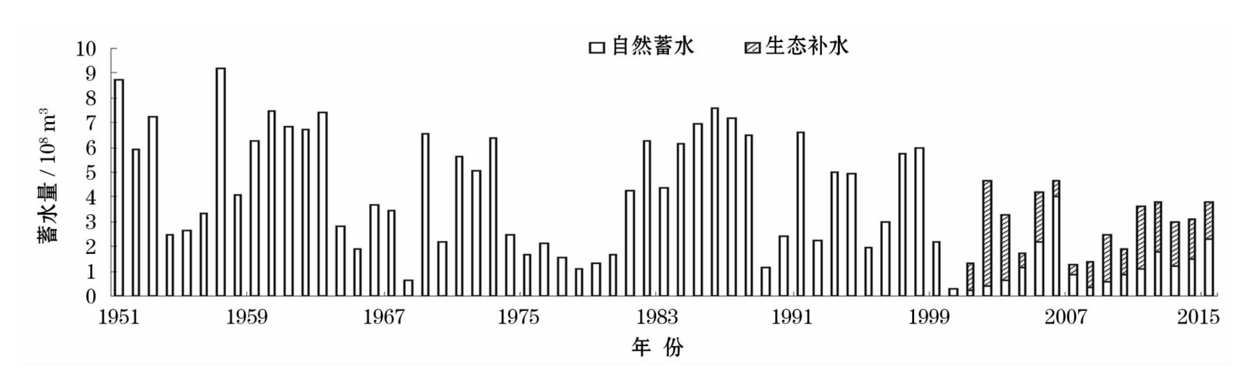


图 4　扎龙湿地近 65 a 的蓄水量

Fig. 4　Change of water storage in recent 65 years

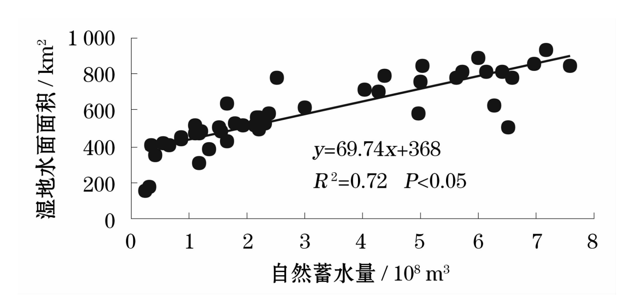


图 5　湿地蓄水量与明水面面积的关系

Fig. 5　Correlation of water storage in the wetland and water areas

致湿地水质恶化。从机理尚进行了阐述研究区湿地迅速退化的原因,所得结论与参考文献[9]的类似。

乌裕尔河上游来水的减少导致扎龙湿地地下水位显著的变化(图 6)。从图可见,扎龙湿地的地表地下水位与降雨量密切相关。每年 7 ~8 月降雨量高峰时段,地下水位都迅速上升至全年当中最高时段,进入 9 月份随着降雨量的减少地下水位迅速下降。1 ~4 月份为扎龙湿地地下水位最低时段。M-K 检验结果表明了扎龙湿地地下水位从 1999—2015 年期间存在显著降低的特征。从图 8b 可见,1999—2003 年期间,地下水位处于波动变化时段。从 2003—2015 年 *UF* 和 *UB* 指数从正值变成负值,并且在这期间整体表现为下降的趋势,表明该时段扎龙湿地地下水位存现显著降低的变化特征,并且

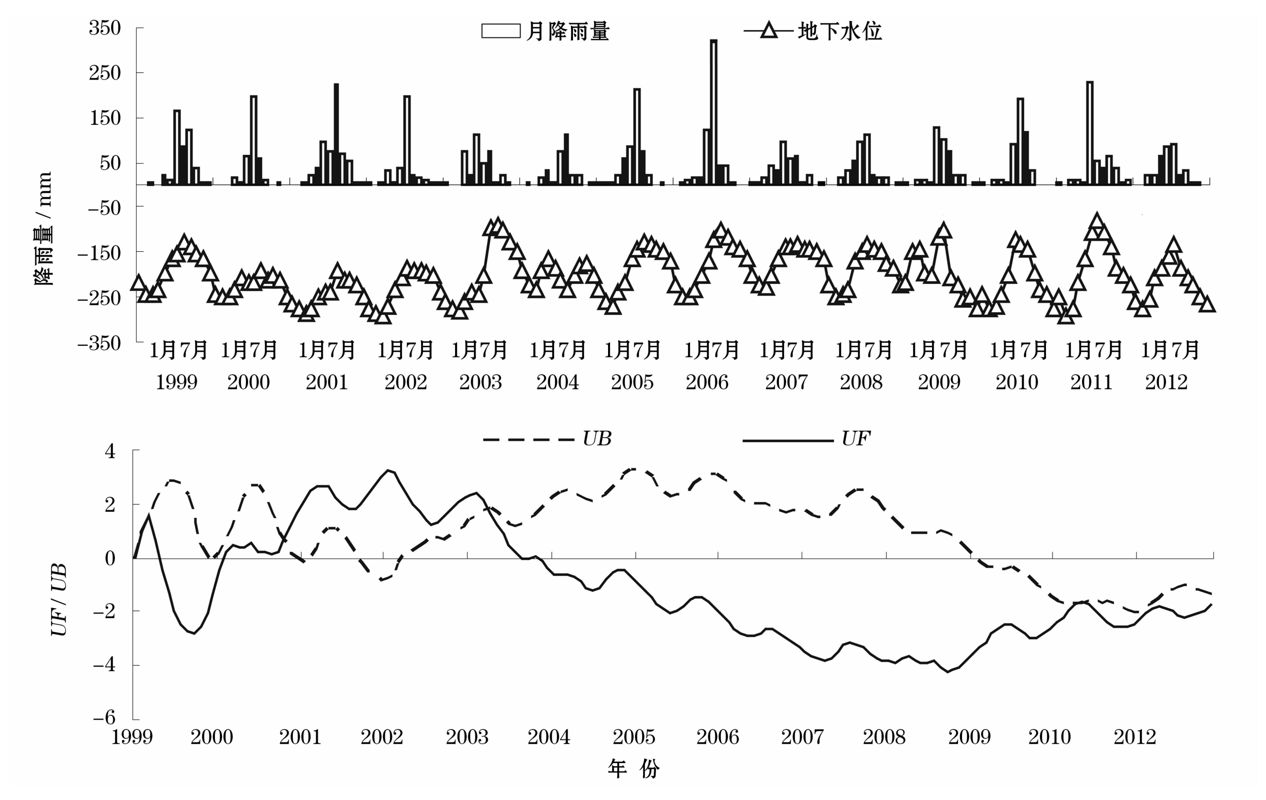


图 6　近 14 a(1999—2012)月累积降雨量以及地下水位波动特征

Fig. 6　Amount of monthly precipitation and fluctuation of groundwater level in recent 14 years (1999—2012)

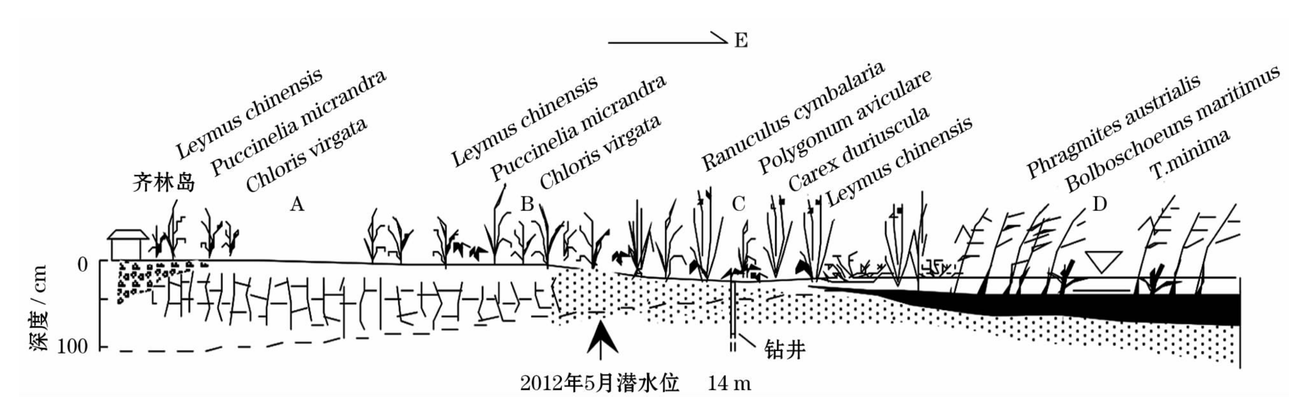


图 7　扎龙湿地小尺度典型土壤—植被特征

Fig. 7　Typical soil-vegetation landscapes at local scale in Zhalong wetland

2003 年检测到地下水位降低的突变点。

湿地水环境的变化(例如水量的减少)将导致湿地系统发生难以修复的变化[1-2,7]。近年来,干旱缺水是研究区的碱性沼泽退化的重要驱动力[16-18]。1954 年以来,松嫩平原西部地区的沼泽减少了 74%。作为松嫩平原西部的盐沼湿地,扎龙湿地也受到强烈缺水干旱的胁迫而表现出持续退化的特征[19]。90 年代以后,扎龙湿地上游每年水量缺口至少为 2×10^8 m^3,河道断流,湿地水位持续下降,很多湖泊干涸露底,沼泽面积减少约 50%。

在小尺度上,扎龙湿地表现出芦苇沼泽—苔草草甸—盐渍化土壤镶嵌分布的微域结构(图 7)。地势低洼部分常年积水发育芦苇沼泽湿地(点 D),沼泽边缘季节性积水,土壤湿度较高,发育拂子茅、小叶章和委陵菜等苔草草甸土点(C)。地势稍高地带,植被(以羊草和碱蓬为主)覆盖度较好的地带,地表积水时间较短,发育轻度盐渍化土壤(浅层苏打盐渍土,B)。在植被受到破坏的区域,覆盖度小,地表积水时间短,这些区域往往发育重度盐渍土(白盖苏打盐渍土,A)。这种微域结构决定了一旦湿地干旱缺水,芦苇沼泽湿地和草甸土将迅速转化盐渍化土壤。

分析可知,乌裕尔河流域上游水环境的变化导致下游的扎龙湿地蓄水量显著减少,湿地地下水水显著下降,沼泽面积也显著减少。湿地面积的减小取而代之的是大面湿地转变成次生盐渍化土壤(图 8)。

随着扎龙湿地缺水导致湿地干旱程度日益严重,湿地面积日益退缩,其结果不仅导致湿地环境的不断恶化,也对在湿地栖息和繁殖的丹顶鹤等珍稀水禽带来巨大的冲击,例如近年来在扎龙湿地栖息

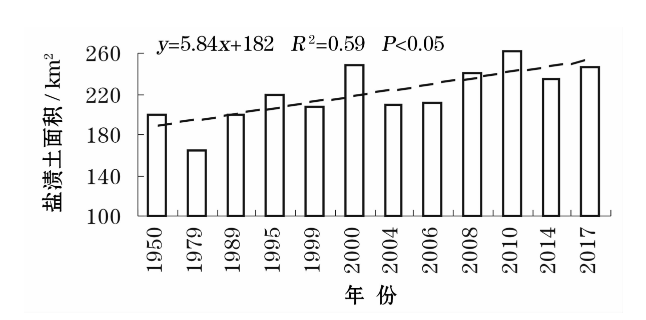


图 8　近 68 a (1950—2017)扎龙湿地盐渍土面积

Fig. 8　Change of saline soil area in Zhalong Wetland in the past 68 years (1950—2017)

和繁殖的野生丹顶鹤数量从 20 世纪的 450 只以上下降到近年不足 250 只。

3　结 论

本文主要探讨了 1951 年以来扎龙湿地系统对乌裕尔河流域上游径流量的变化的响应,得到如下结论:

扎龙湿地迅速退化与乌裕尔河流域径流量的变化密切相关。乌裕尔河中下游的径流量自 20 世纪 80 年代初出现显著性减少。近年来,在乌裕尔河上游的径流量也没有发生显著性的变化的前提下,下游来水自 20 世纪 80 年代初出现显著性减少。扎龙湿地来水组成发生显著的变化,其中上游来水比例从 20 世纪的 40% 下降到当前的不足 15%。

上游来水减少导致湿地水面面积与湿地自然蓄水量显著减少,使湿地长期处于干旱缺水状态。湿地干旱缺水导致近年来湿地水面面积也正不断缩减,21 世纪以来扎龙湿地明水面减少 46%。扎龙湿地地下水位从 1999—2015 年期间存在显著降低的特征,并且 2003 年检测到地下水位降低的

突变点。

湿地持续干旱缺水导致大面积的沼泽消失,取而代之的是迅速转变成次生盐渍化土壤。扎龙湿地自 1950 年以来盐渍土面积整体表现为线性增加的变化特征,1950 年盐渍土面积 192 km^2,到 2010 盐渍化面积增加到 260 km^2 以上,而且相当部分盐渍化土壤分布在核心区。湿地持续退化对在湿地栖息和繁殖的丹顶鹤等珍稀水禽带来巨大的冲击。

致谢:本文实验过程得到了齐齐哈尔大学地理本科 151 班的李叶、于溪、冯岩、胡冰玉、刘永祥、程小峰和张东宁同学的帮助,在此表示感谢。

参考文献(References)

[1] MITSCH W J,GOSSELINK J G. Wetlands[M]. 2nd ed. New York: Van Nostrand Reinho,1993:25 – 38.

[2] LIOUBIMTSEVA E,HENEBRY G. Climate and environmental change in arid Central Asia: Impacts, vulnerability, and adaptations[J]. Journal of Arid Environment,2009,73:963 – 977.

[3] SPANDEY J S,JOSEPH V,KAUL S N. A zone-wise ecological-economic analysis of Indian wetlands[J]. Environmental Monitoring and Assessment,2004,98:261 – 273.

[4] KOTB T H S,WATANABE T,OGINO Y,et al. Soil salinization in the Nile Delta and related policy issues in Egypt[J]. Agricultural water management,2000,43(2):239 – 261.

[5] KHAN S,XEVI E,MEYER W S. Salt,water,and groundwater management models to determine sustainable cropping patterns in shallow saline groundwater regions of Australia[J]. Journal of Crop Production,2003,7(1/2):325 – 340.

[6] 卞建民,林年丰,汤洁. 吉林西部向海湿地环境退化及驱动机制研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2004,34(3):441 – 445. [BIAN Jiannian,LIN Nianfeng,TANG Jie. The environment degradation and its driving mechanism of Xianghai wetland in the west of Jilin Province[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition),2004,34(3):441 – 445.]

[7] 吕宪国. 中国湿地与湿地研究[M]. 石家庄:河北科学技术出版社,2008:35 – 38. [LYU Xianguo. Wetland in China and Research[M]. Shijiazhuang:Hebei Science & Technology Publishing House,2008:35 – 38.]

[8] YANG Fan,AN Huofeng,MA Hongyuan,et al. Variations on soil salinity and sodicity and its driving factors analysis under microtopography in different hydrological conditions[J]. Water,2016,8(9):1 – 13.

[9] 佟守正,吕宪国,苏立英,等. 扎龙湿地生态系统变化过程及影响因子分析[J]. 湿地科学,2008,6(2):179 – 184. [TONG Shouzheng,LYU Xianguo,SU Liying,et al. Changing process and the impact factors of wetland ecosystem in Zhalong Wetland[J]. Wetland Science,2008,6(2):179 – 184.]

[10] 张玉红,张树清,苏立英. 基于 3S 的扎龙湿地土地盐碱化趋势分析[J]. 农业系统科学与综合研究,2010,26(2):140 – 144. [ZHANG Yuhong,ZHANG Shuqing,SU Liying. Analysis of basic trend at Zhalong Wetland based on 3S[J]. System Science and Comprehensive Study in Agriculture,2010,26(2):140 – 144.]

[11] WANG Z,HUANG N,LUO L,et al. Shrinkage and fragmentation of marshes in the West Songnen Plain,China,from 1954 to 2008 and its possible causes[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,2011,13(3): 477 – 486.

[12] 冯夏青,章光新. 自然—人为双重作用下扎龙湿地水文情势分析[J]. 资源科学,2010,32(12):2316 – 2323. [FENG Xiaqin,ZHANG Guangxin. Analysis of the hydrologic regime affected by natural and human factors over the Zhalong Wetland[J]. Resources Science,2010,32(12):2316 – 2323.]

[13] WANG Li,SEKI K,MIYAZAKI T,et al. The causes of soil alkalinization in the Songnen Plain of Northeast China[J]. Paddy and Water Environment,2009,(7):259 – 270.

[14] 罗金明,王永洁,柏林,等. 扎龙盐沼湿地旱化特征及其对演替的影响[J]. 干旱区研究,2018,35(5) :1167 – 1172. [LUO Jinming,WANG Yongjie,BAI Lin,et al. Effect of drought stress on succession of the Zhalong wetland [J]. Arid Zone Research,2018,35(5):1167 – 1172.]

[15] 周林飞,许士国,李青山,等. 扎龙湿地生态环境需水量安全阈值的研究[J]. 水利学报,2007,38(7):845 – 851. [ZHOU Linfei,XU Shiguo,LI Qinshan,et al. Safety threshold of eco-environmental water requirement in Zhalong wetland,northeastern China [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2007,38(7):845 – 851.]

[16] PARTAL T,KAHYA E. Trend analysis in Turkish precipitation data [J]. Hydrological Processes,2006,20:2011 – 2016.

[17] GAO X,SCHLOSSER C A,MORGAN E R. Potential impacts of climate warming and increased summer heat stress on the electric grid: A case study for a large power transformer (LPT) in the Northeast United States[J]. Climatic change,2018,147(1/2):107 – 118.

[18] FENG Xiaqin,ZHANG Guangxin,YIN Xiongrui. Hydrological response to climate change in Nenjiang River Basin,Northeastern China[J]. Water Resource Management,2011,25:677 – 689.

[19] QIU J. China faces up to 'terrible' state of its ecosystems: Wetlands hardest hit by land reclamation and pollution[J]. Nature,2011,471(7336):19.

Hydrological response of the Zhalong saline marsh to the change of the runoffs in the Wuyur catchment, northeastern China

LUO Jin-ming, WANG Yong-jie, LIU Fu-gang, BAI Lin, WANG Zhi-liang

(*Department of Science, Qiqihar University, Qiqihar* 161006, *Heilongjiang, China*)

Abstract: Change of the hydrological environment in the Wuyur catchments (Helongjiang Province, northeastern China) resulted in the rapid degradation of the wetland in the lower reaches. The hydrological response of the Zhalong saline marsh system to the change of runoffs in the Wuyur catchments was analyzed with the Mann-Kendall test and moving *t*-test method. The results indicated that the runoff entering the wetland was significantly decreased since 1980s, i. e., the runoffs was decreased from 0.8×10^8 m^3 in 1960s to less than 0.5×10^8 m^3 in the 21st century, with an exception of less than 0.1×10^8 m^3 in 1979 due to lack of precipitation. Change of the runoff in Wuyur catchments caused water shortage and the water area in Zhalong wetland shrunk significantly, and the water level decreased since 2003. The consistent drought and water depletion caused a large area of marsh to be disappeared and generated large area secondary salinization. The area of saline soil was merely 192 km^2 in 1950, nevertheless, it was significantly increased up to more than 200 km^2 in 1995, and reached 260 km^2 in 2010, of which a large portion was located in the core area of the Zhalong wetland. The wetland degradation would bring about great impact on the rare species which habitat and breed in this area.

Key words: inland saline marsh; degradation of wetland; salinization; drought stress